

# CONTROL ÓPTIMO EN CANALES DE RIEGO: ESTUDIO DE CASOS TEST ASCE.

*Ambroj, S.<sup>1</sup>, García-Navarro, P.<sup>2</sup>, Burguete, J.<sup>3,4</sup>*

<sup>1</sup> Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei (CSIC), Avda. de Montañana 1005, 50059 Zaragoza, [samuel.ambroj@csic.es](mailto:samuel.ambroj@csic.es)

<sup>2</sup> Mecánica de Fluidos, Centro Politécnico Superior (Universidad de Zaragoza), María de Luna 3, 50018 Zaragoza, [pigar@unizar.es](mailto:pigar@unizar.es)

<sup>3</sup> Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei (CSIC), Avda. de Montañana 1005, 50059 Zaragoza, [jbarguete@eead.csic.es](mailto:jbarguete@eead.csic.es)

<sup>4</sup> BIFI Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos de la Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor, edificio I+D, 50018 Zaragoza

## Resumen

En este trabajo se han estudiado varios casos propuestos por ASCE sobre algoritmos de automatización de canales. Éstos se basan en dos canales operativos en la actualidad, siendo el comportamiento de ellos muy diferente. El canal 1 presenta tiempos de respuesta rápidos y tiene poca capacidad de almacenamiento; mientras que, el canal 2 es tres veces más extenso, menos empinado y tiene una capacidad de almacenamiento superior. Ambos canales tienen 8 tramos separados por compuertas transversales verticales. El objetivo de estos tests es controlar el nivel de agua en 8 puntos de control situados a 5m del final de cada tramo, mediante el movimiento de las compuertas. Se ha generado un software de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de St-Venant, usando un método upwind de primer orden para el cálculo del flujo transitorio, en canales con presencia de compuertas y extracciones. Se ha implementado un método de control PID para buscar el movimiento óptimo de las compuertas. Los coeficientes del método PID se han optimizado mediante dos algoritmos distintos que requieren un gran número de simulaciones: un algoritmo genético y un método de MonteCarlo. Se ha llevado a cabo la paralelización del código para la reducción de los tiempos de cálculo. Finalmente, se han comparado los resultados obtenidos con ambos algoritmos de optimización.

## 1.- Introducción y Objetivos

El control óptimo de canales de riego es un reto de suma importancia en la actualidad. Los propósitos principales de la regulación de canales en flujo libre son controlar los niveles de agua y caudales para minimizar fluctuaciones en los caudales proporcionados a los usuarios. Asimismo se pretende evitar la ruptura y desbordamiento de los canales. La regulación puede llevarse a cabo mediante control automático o manual dependiendo de diversos factores.

El propósito de este trabajo es la resolución de 2 casos test descritos por ASCE sobre algoritmos de automatización de canales (*Clemmens et al. 1998*) mediante dos algoritmos de optimización distintos: un algoritmo genético (*Mitchell 1999*) y un método de MonteCarlo. Para ello se ha definido una función objetivo,  $J$ , y se ha buscado su minimización. Ambos métodos han usado el mismo algoritmo PID en su búsqueda de la solución óptima de los casos test.

Se ha buscado el control de los niveles de agua en 8 puntos de control actuando sobre 7 compuertas transversales verticales. Debido a que la distribución de

agua se hace mediante extracciones por gravedad y las compuertas de extracción no son de última tecnología, el reparto de agua es óptimo si se mantiene el nivel de agua constante en las tomas. Se han implementado dos casos test de los propuestos originalmente: el caso 1 del canal 1 y el caso 1 del canal 2. Ambos se describen en las Tablas 3 y 4.

En la literatura de estos casos ASCE se indica que el régimen de funcionamiento de las compuertas (libre, presión, vertido por coronación) es fijo, impidiendo transiciones de uno a otro. En este trabajo se ha usado un método de tratamiento numérico de las compuertas que realiza una transición continua entre sus diferentes modos de operación, evitando discontinuidades no físicas presentes en las transiciones entre distintos regímenes de funcionamiento.

## 2.- Materiales y Métodos

### 2.1.- Modelo de aguas poco profundas

El flujo unidimensional en canales abiertos puede modelarse mediante las ecuaciones de St-Venant (*de Saint-Venant 1871*). Las ecuaciones de St-Venant unidimensionales realizan un promedio en la sección transversal de las ecuaciones de Navier-Stokes. Éstas tienen en cuenta la conservación de la masa y el momento lineal, suponiendo una distribución de presión hidrostática.

La forma conservativa de las ecuaciones de St-Venant puede expresarse en forma vectorial como:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}^c}{\partial x} = \mathbf{H}^c \quad (1)$$

Donde  $x$  es la coordenada longitudinal,  $t$  es el tiempo,  $\mathbf{U}$  es el vector de las variables conservadas,  $\mathbf{F}^c$  es el vector de los flujos conservativos y  $\mathbf{H}^c$  es el vector de los términos fuente conservativos.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}^c = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}^c = \begin{pmatrix} -Q_e \\ g[I_2 + A(S_0 - S_f)] \end{pmatrix} \quad (2)$$

donde  $A$  es el área mojada de la sección transversal,  $Q$  es el caudal,  $Q_e$  es el caudal extraído en las tomas,  $g$  es la constante gravitatoria y  $S_0$  es la pendiente longitudinal del fondo. La pendiente de fricción longitudinal,  $S_f$ , está relacionada con la fricción de las paredes mediante la ley empírica de Gauckler-Manning:

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q| P^{4/3}}{A^{10/3}} \quad (3)$$

siendo  $n$  el coeficiente de fricción de Gauckler-Manning y  $P$  el perímetro mojado de la sección transversal.

Los términos  $I_1$  e  $I_2$  tienen en cuenta a las fuerzas de presión:

$$I_1 = \int_0^h \sigma(x, z') (h - z') dz', \quad I_2 = \int_0^h \frac{\partial \sigma(x, z')}{\partial x} (h - z') dz' \quad (4)$$

donde  $h$  es la altura de agua y  $\sigma(x, z')$  es la variable anchura de canal a una distancia  $z'$  del fondo de la sección.

La Figura 1 muestra el sistema de coordenadas empleado en una sección transversal.

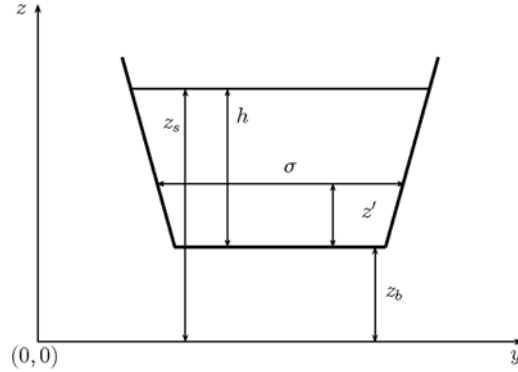


Figura 1. Sistema de coordenadas en la sección transversal.

## 2.2.- Esquema numérico

Para resolver las ecuaciones de St-Venant unidimensionales se ha usado un esquema upwind de primer orden. Éstos están basados en la idea de aproximar las derivadas espaciales mediante diferencias no centradas influenciadas por el sentido de propagación de la información en el problema físico. Definiendo  $\Omega^\pm$  como:

$$\Omega^\pm = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \pm \text{sign}(\lambda_1) & 0 \\ 0 & 1 \pm \text{sign}(\lambda_2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

siendo  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  los valores propios del jacobiano de los flujos conservativos (Burguete & García-Navarro 2001):

$$\lambda_1 = u + c, \quad \lambda_2 = u - c, \quad u = \frac{Q}{A}, \quad c = \sqrt{\frac{gA}{B}} \quad (6)$$

en donde  $u$  es la velocidad promediada en la sección transversal,  $c$  es la velocidad de las ondas superficiales infinitesimales y  $B$  es la anchura de agua en la parte más alta de la sección transversal.

La discretización numérica se realiza de la siguiente manera (Burguete & García-Navarro 2001):

$$\Delta U_i^n \delta x_i = \Delta t \left[ [\mathbf{P}\Omega^+ \mathbf{P}^{-1}(\mathbf{H}^c \delta x - \delta \mathbf{F})]_{i-\frac{1}{2}}^n + [\mathbf{P}\Omega^- \mathbf{P}^{-1}(\mathbf{H}^c \delta x - \delta \mathbf{F})]_{i+\frac{1}{2}}^n \right] \quad (7)$$

donde  $\mathbf{P}$  es la matriz cuyas columnas son los vectores propios del jacobiano y  $\mathbf{P}^{-1}$  es su inversa:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}^{-1} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \begin{pmatrix} \lambda_2 & -1 \\ -\lambda_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Se ha usado una extensión de los promedios de Roe definiendo  $u_{i+1/2}$  y  $c_{i+1/2}$  como (Burguete & García-Navarro 2001):

$$u_{i+1/2} = \frac{Q_{i+1}/\sqrt{A_{i+1}} + Q_i/\sqrt{A_i}}{\sqrt{A_i} + \sqrt{A_{i+1}}}, \quad c_{i+1/2} = \sqrt{\frac{gA_{i+1/2}}{B_{i+1/2}}} \quad (9)$$

Para los promedios discretos  $A_{i+1/2}$ ,  $B_{i+1/2}$ ,  $(S_0)_{i+1/2}$  y  $(S_f)_{i+1/2}$  se han empleado promedios aritméticos simples.

### 2.3.- Casos test de ASCE

Estos tests están basados en canales operativos en la actualidad. Diversos autores han estudiado su resolución por distintos métodos (*Akouz et al. 1998; Clemmens & Wahlin 2004; Wahlin 2004; Guitart et al. 2008*). El canal 1 es un canal con una longitud de 9500m, empinado ( $S_0 = 0.002$ ), con tiempos de respuesta rápidos y poca capacidad de almacenamiento; mientras que, el canal 2 es un canal más extenso (28000m), con menor pendiente ( $S_0 = 0.0001$ ), tiempos de respuesta más lentos y una capacidad de almacenamiento mayor. Después de cada compuerta, ambos presentan caídas de fondo de 1 y 0.2 m para los canales 1 y 2 respectivamente. El valor del coeficiente de fricción de Gauckler-Manning también es distinto, siendo sus valores 0.014 y 0.02 s·m<sup>-1/3</sup> respectivamente. Las características principales de estos canales se muestran en las Tablas 1 y 2. La programación de la demanda de agua en las extracciones para los dos casos de estudio vienen determinadas en las Tablas 3 y 4.

Tabla 1. Características constructivas principales del canal 1.

Tramo	Longitud (m)	Anchura fondo (m)	Profundidad (m)	Anchura compuerta (m)	Altura compuerta (m)	Nivel Objetivo (m)
1	100	1.0	1.1	1.5	1.0	0.9
2	1200	1.0	1.1	1.5	1.0	0.9
3	400	1.0	1.0	1.5	0.9	0.8
4	800	0.8	1.1	1.2	1.0	0.9
5	2000	0.8	1.1	1.2	1.0	0.9
6	1700	0.8	1.0	1.2	0.9	0.8
7	1600	0.6	1.0	1.0	0.9	0.8
8	1700	0.6	1.0	----	----	0.8

Tabla 2. Características constructivas principales del canal 2.

Tramo	Longitud (m)	Anchura fondo (m)	Profundidad (m)	Anchura compuerta (m)	Altura compuerta (m)	Nivel Objetivo (m)
1	7000	7.0	2.5	7.0	2.3	2.1
2	3000	7.0	2.5	7.0	2.3	2.1
3	3000	7.0	2.5	7.0	2.3	2.1
4	4000	6.0	2.3	6.0	2.1	1.9
5	4000	6.0	2.3	6.0	2.1	1.9
6	3000	5.0	1.9	5.0	1.8	1.7
7	2000	5.0	1.9	5.0	1.8	1.7
8	2000	5.0	1.9	----	----	1.7

Tabla 3. Características simulaciones hidráulicas canal 1, caso 1.

Tramo	Extracción inicial deseada (m <sup>3</sup> /s)	Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)	Cambio extracción a las 2 h (m <sup>3</sup> /s)	Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)	Cambio extracción a las 14 h (m <sup>3</sup> /s)	Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)
Entrada	----	0.8	----	1.0	----	0.8
1	0.1	0.7	----	0.9	----	0.7
2	0.1	0.6	----	0.8	----	0.6
3	0.1	0.5	+0.1	0.6	----	0.4
4	0.1	0.4	+0.1	0.4	-0.1	0.3
5	0.1	0.3	----	0.3	-0.1	0.3
6	0.1	0.2	----	0.2	----	0.2
7	0.1	0.1	----	0.1	----	0.1
8	0.1	0.0	----	0.0	----	0.0

Tabla 4. Características simulaciones hidráulicas canal 2, caso 1.

Tramo	Extracción inicial deseada (m <sup>3</sup> /s)	Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)	Cambio extracción a las 2 h (m <sup>3</sup> /s)	Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)	Cambio extracción a las 14 h (m <sup>3</sup> /s)	Caudal resultante (m <sup>3</sup> /s)
Entrada	----	11.0	----	13.5	----	11.5
1	1.0	10.0	----	12.5	----	10.5
2	1.0	9.0	----	11.5	----	9.5
3	1.0	8.0	----	10.5	----	8.5
4	1.0	7.0	+1.5	9.5	----	7.5
5	1.0	6.0	+1.0	7.0	----	5.0
6	1.0	5.0	----	5.0	-2.0	5.0
7	1.0	4.0	----	4.0	----	4.0
8	1.0	3.0	----	3.0	----	3.0

## 2.4.- Método PID

El método PID es uno de los métodos más usados en procesos de control automático. En nuestro trabajo, el algoritmo PID busca la optimización de 3 parámetros para cada una de las 7 compuertas que se controlan; por tanto, la búsqueda de la solución óptima requiere la optimización simultánea de 21 variables. Los parámetros de cada compuerta individual son los siguientes:

- Intervalo de actuación,  $t_{act}$
- Movimiento de actuación,  $m_{gate}$
- Tolerancia permitida,  $tol$

La explicación de estas 3 variables puede comprenderse mejor con la ayuda de la Figura 2:

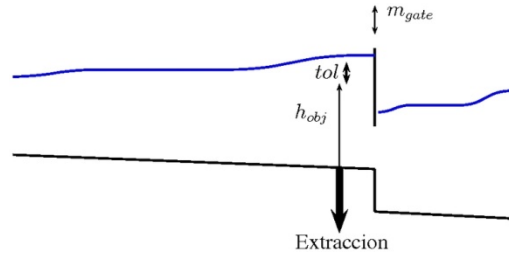


Figura 2. Esquema explicativo de las 3 variables de control presentes en cada una de las compuertas.

Durante el intervalo de actuación,  $t_{act}$ , se calcula el valor medio de la altura de la lámina de agua en el punto de control. Si el valor medio de la altura en el punto de extracción está fuera del valor objetivo  $\pm$  la tolerancia; entonces, se producirá el movimiento de la compuerta determinado por  $m_{gate}$ . Si el valor medio de la altura está dentro de la tolerancia, la compuerta mantiene el valor de su apertura.

Para determinar cuál es la mejor elección de variables es necesario definir una función objetivo (norma de error). En nuestro caso la hemos definido de la siguiente manera:

$$J = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{p_i}{\sum_{i=1}^8 p_i} \sum_{t=0}^T \frac{\Delta t (h_t^s - h_i^{obj})^2 \rho_i^{desb}}{(h_i^{obj})^2 T} \right) \quad (10)$$

donde  $p_i$  es el peso del error asociado al punto de control  $i$ -ésimo,  $T$  es el tiempo total,  $h_t^s$  es la altura de agua simulada en el punto de control en el tiempo,  $h_i^{obj}$  es la altura objetivo en el punto de control  $i$ -ésimo. Además hemos añadido un factor de penalización en el caso de desbordamiento en cada uno de los puntos de control,  $\rho_i^{desb}$ . En nuestros resultados, los pesos y penalizaciones por desbordamiento son iguales en los 8 puntos de control, siendo sus valores ( $p_i = 1$ ,  $\rho_i^{desb} = 1000$ ).

## 2.5.- Algoritmos de optimización

El método de MonteCarlo es un método de fuerza bruta. Éste consiste en asignar un valor aleatorio a cada una de las variables dentro del intervalo definido para cada una de ellas.

Otro de los algoritmos de optimización usados para obtener el mejor modo de actuación de las compuertas es un algoritmo genético. La idea básica es imitar la evolución de un grupo de criaturas de la misma especie. Los individuos que se adaptan mejor a los requerimientos impuestos por su entorno tienen una probabilidad mayor de supervivencia, pasando sus genes a las sucesivas generaciones más frecuentemente que los otros.

En la Tabla 5 se muestran los valores elegidos para los intervalos de las variables, siendo lógicamente iguales para los algoritmos genéticos y el método de MonteCarlo.

Tabla 5. Intervalos de cada una de las variables de control.

Test	tol	t <sub>act</sub> (s)	m <sub>gate</sub> (m)
<b>Canal 1, caso 1</b>	0.003 – 0.09	30 - 1000	0.01 – 0.11
<b>Canal 2, caso 1</b>	0.003 – 0.09	100 - 3600	0.01 – 0.09

Se ha llevado a cabo la paralelización del código de ambos algoritmos para la reducción de los tiempos de cálculo. Los cálculos necesarios en este trabajo fueron realizados en un clúster con 28 procesadores Intel i7 consumiendo aproximadamente 8 días de simulación. Sin esta paralelización, un problema como el que se plantea hubiera requerido más de medio año de computación haciendo la optimización inviable.

### 3.- Resultados y Discusión

En cada compuerta se han optimizado tres variables relevantes (intervalo y movimiento en cada actuación, y tolerancia permitida) para la consecución del objetivo de mantener una altura de agua constante en cada uno de los 8 puntos de control.

En nuestras simulaciones se han observado transiciones entre los distintos modos de funcionamiento de las compuertas en su respuesta transitoria. Se ha aumentado la flexibilidad en el manejo de los canales, al permitir que las compuertas puedan actuar en distintos modos de operación, eliminando las discontinuidades producidas en los cambios entre modos.

Los valores óptimos obtenidos mediante algoritmos genéticos y método de MonteCarlo se muestran en las Tablas 6 y 7. Sorprendentemente, se observa en ambos casos que el método de MonteCarlo obtiene una mejor optimización.

Tabla 6. Resultados óptimos del canal 1, caso 1. Control aguas arriba.

Genéticos			MonteCarlo		
tol (x 10 <sup>-2</sup> )	t <sub>act</sub> (s)	m <sub>gate</sub> (cm)	tol (x 10 <sup>-2</sup> )	t <sub>act</sub> (s)	m <sub>gate</sub> (cm)
3.62	867.8	3.83	5.26	355.3	1.19
0.89	48.3	9.08	4.34	237.6	4.76
6.00	118.3	2.93	7.47	49.4	9.90
2.41	32.5	2.17	7.54	703.8	3.55
2.80	61.5	7.64	3.56	154.5	8.82
1.75	957.7	1.14	0.38	30.4	6.41
1.45	43.2	2.51	3.55	58.3	7.55
<b>J = 1.77</b>			<b>J = 1.39</b>		

Tabla 7. Resultados óptimos del canal 2, caso 1. Control aguas abajo.

Genéticos			MonteCarlo		
tol ( $\times 10^{-2}$ )	t <sub>act</sub> (s)	m <sub>gate</sub> (cm)	tol ( $\times 10^{-2}$ )	t <sub>act</sub> (s)	m <sub>gate</sub> (cm)
5.36	2320.6	1.44	3.29	1638.9	6.32
0.95	226.1	6.60	8.03	2218.8	8.61
4.24	200.2	7.80	1.06	137.4	5.85
5.78	956.5	5.35	1.03	2407.0	6.04
3.80	208.7	6.26	0.49	236.2	5.79
1.55	3074.9	2.47	7.20	1167.6	2.67
0.82	522.3	6.78	7.99	1738.3	7.69
$J = 7.20 \times 10^{-1}$			$J = 2.90 \times 10^{-3}$		

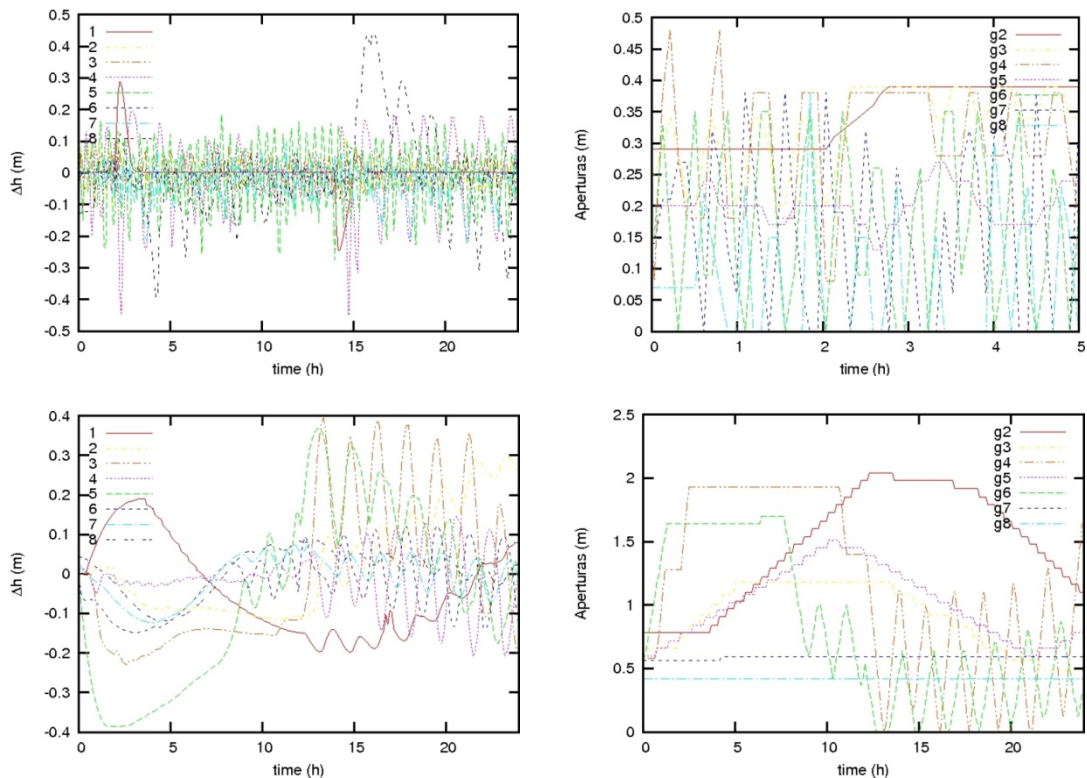


Figura 3. Resultados para  $J$  mínimo en el canal 1, caso 1 arriba y en el canal 2, caso 1 abajo. Izda.: variaciones de las alturas en los puntos de control respecto de su altura objetivo. Dcha.: evolución de la apertura de las compuertas a lo largo del tiempo.

En la Figura 4 se ha representado el valor de  $J$  para el canal 1, caso 1 obtenido al realizar 100000 simulaciones con el método de MonteCarlo, frente a una de las variables a optimizar. No parece observarse sensibilidad alguna a esta variable. El comportamiento de  $J$  frente al resto de variables es análogo tanto en este canal como en el canal 2. Por tanto, al no observarse sensibilidad frente a las variables a optimizar, estos problemas parecen especialmente mal condicionados para los algoritmos de optimización. Probablemente ningún algoritmo convergente como los algoritmos genéticos ensayados en este trabajo o algoritmos basados en cadenas de Markov sean capaces de mejorar los resultados de los algoritmos de fuerza bruta.



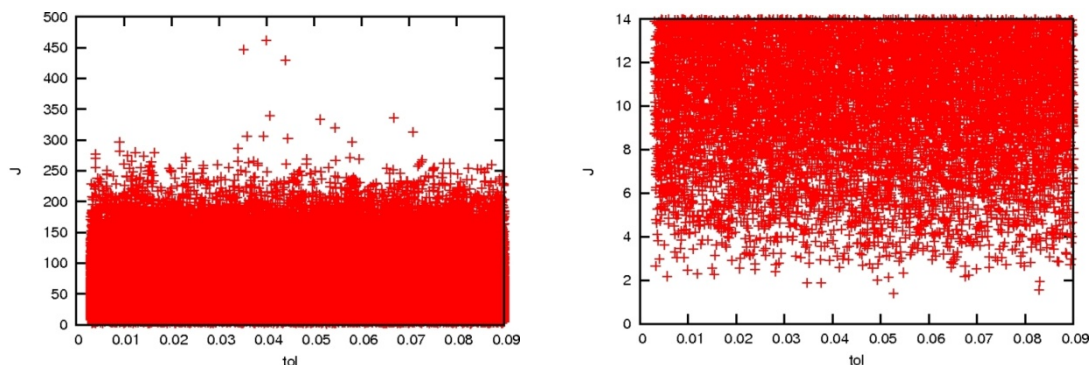


Figura 4. Sensibilidad para una de las variables de control del canal 1, caso 1. Izda.: todas las simulaciones. Dcha.: zoom de la zona con valores menores de  $J$ .

#### 4.- Conclusiones y Recomendaciones

Los autores han desarrollado todo el software necesario para la optimización de canales con presencia de compuertas y extracciones. Se ha validado su funcionamiento con los casos ASCE. Los algoritmos de optimización empleados han requerido un gran número de simulaciones. La paralelización de los códigos ha permitido obtener el funcionamiento óptimo en tiempos de cálculo razonables.

Se ha conseguido regular el funcionamiento del canal 2, caso 1 sin que se produzca desbordamiento en ningún momento y produciéndose cambios de régimen en las compuertas. No ha sido posible regular el canal 1, caso 1 sin producir desbordamiento (obsérvese Figura 3 en el entorno de 15 h). Este canal presenta tiempos de respuesta rápidos y muy escasa capacidad de almacenamiento. Se puede concluir que estudios como el realizado son muy útiles en el diseño de canales de riego reales, ya que pueden identificar las zonas de los canales donde sería más probable que se produjera desbordamiento, pudiendo dar recomendaciones como el aumento de resguardo en algunos tramos.

El estudio de la sensibilidad de la función objetivo,  $J$ , en los casos ASCE, parece indicar que están especialmente mal condicionados para los métodos de optimización. Probablemente en estos casos, métodos basados en fuerza bruta sean los más convenientes.

#### 5.- Agradecimientos

El trabajo de S. Ambroj es financiado por una beca JAE-Predoc del CSIC, cofinanciada por el Fondo Social Europeo. Los autores también quieren agradecer al BIFI (Instituto de biocomputación y física de sistemas complejos) de la universidad de Zaragoza por el uso de sus instalaciones para la realización de los cálculos numéricos.

## 6.- Referencias

- Akouz K., Benhammou A., Malaterre P., Dahhou B., Roux G., 1998. Predictive control applied to ASCE canal 2. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (1-5): 3920-3924
- Burguete J., García-Navarro P., 2001. Efficient construction of high-resolution TVD conservative schemes for equations with source terms: application to shallow-water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 37(2): 209-248
- Clemmens A., Kacerek T., Grawitz B., Schuurmans W., 1998. Test cases for canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering – ASCE* 124(1): 23-30
- Clemmens A., Wahlin B., 2004. Simple optimal downstream feedback canal controllers: ASCE test case results. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering – ASCE* 130(1): 35-46
- Clemmens A., Wahlin B., 2004. Simple optimal downstream feedback canal controllers: ASCE test case results. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering – ASCE* 130(1): 35-46
- de Saint-Venant A. J. C., 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des mares dans leur lit. *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences* 73: 147-154
- Guitart J. S., Valentin M. G., Benede J. R., 2008. A control tool for irrigation canals with scheduled demands. *Journal of Hydraulic Research* 46(1): 152-167
- Mitchell M., 1999. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, Cambridge.
- Wahlin B., 2004. Performance of model predictive control on ASCE test canal 1. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130(3): 227-238